7 INGRÉDIENTS, MÉLANGES ET APPLICATION DES ENGRAIS

Engrais

Quel que soit l'engrais, la nature de ses constituants, la façon dont ceux-ci sont mélangés et la méthode d'application utilisée auront une grande influence sur le programme de fertilisation. La plupart des engrais utilisés en Ontario se présentent sous forme de granulés, mais ils viennent aussi sous forme gazeuse ou liquide. Tous ces produits sont décrits ci-dessous et énumérés dans le tableau 7–1, qui précise de plus leur formulation (% de N-P_2O_5-K_2O en poids) ainsi que leurs caractéristiques chimiques, de manutention et d'utilisation.

Environ 70 % des éléments nutritifs minéraux épandus sur les champs en Ontario sont sous forme de granulés. Ils sont en général plus concentrés que les engrais liquides et relativement moins coûteux. Les exigences d'entreposage, de manutention et de transport qui s'appliquent à ces engrais sont différentes de celles qui s'appliquent aux engrais liquides ou gazeux. Les granulés peuvent être mélangés entre eux de façon à obtenir une formulation composée adaptée aux besoins des cultures.

En règle générale, les engrais liquides ont un coût de revient plus élevé par unité d'élément nutritif que les granulés en raison du poids et du volume supplémentaires qu'il faut transporter et, dans certains cas, en raison des traitements supplémentaires qu'ils doivent subir. En contrepartie, les engrais liquides se prêtent au pompage et sont faciles à mesurer et à mettre en place avec précision. Voir le tableau 7–1, p. 182.

En 2006, pour une même teneur en éléments nutritifs, l'engrais 10-34-0 coûtait 54 % plus cher que l'engrais sous forme de phosphate diammonique. L'écart est encore plus grand dans le cas des engrais complets N-P-K, où les liquides peuvent coûter deux fois plus cher que leur équivalent en granulés.

Sources d'azote (N)

Urée (46-0-0)

- produit blanc; $CO(NH_2)_2$;
- produit synthétique obtenu à partir d'ammoniac et de dioxyde de carbone;
- source d'engrais azoté la plus couramment utilisée dans le monde entier;
- peut contenir de petites quantités (0,5–1,5 %) de biuret, environ 0,3 % d'un agent de conditionnement (formaldéhyde ou méthylène diurée) et moins de 0,5 % d'eau;
- les formulations destinées aux applications foliaires devraient renfermer moins de biuret.

L'urée se convertit en azote ammoniacal dans le sol. L'urée se

convertit en azote ammoniacal dans le sol. L'uréase, une enzyme présente dans les sols, les bactéries et les résidus de cultures, accélère la conversion. L'urée épandue à la surface du sol est sujette aux pertes d'ammoniac. Les pertes augmentent avec le pH du sol, la quantité de résidus et l'élévation des températures.

Nitrate d'ammonium (34-0-0)

- NH_4NO_3;
- produit de la combinaison de l'ammoniac et de l'acide nitrique;
- peut contenir environ 1 % d'un agent de conditionnement et 0,5 % d'eau;
- coûte plus cher par unité d'azote que l'urée;
- n'est plus produit au Canada;
- des règlements s'appliquent à son transport (classe 5.1 en vertu du *Règlement sur le transport des marchandises dangereuses*);
- à conserver loin des huiles et autres matières inflammables, car il peut former un mélange explosif;
- plus hygroscopique que l'urée, peut se détériorer pendant l'entreposage, par temps très chaud, à mesure que les changements dans la phase cristalline entraînent la dégradation des sphérules.

Lorsqu'il est appliqué sur le sol, le nitrate d'ammonium se dissout dans l'eau du sol et libère de l'ammonium et du nitrate, l'un et l'autre pouvant être prélevés par les plantes. Il devient assimilable un peu plus rapidement que l'urée à basses températures, mais dans les conditions de culturales normales, il n'y a pratiquement pas de différence.

Nitrate d'ammonium et de calcium (27-0-0)

- mélange uniforme renfermant 80 % de nitrate d'ammonium et soit de la chaux calcitique, soit de la chaux dolomitique;
- la chaux réduit les risques d'explosion.

Quand il est épandu avec une quantité de N équivalente en poids, le nitrate d'ammonium et de calcium est semblable au nitrate d'ammonium. La chaux présente dans les granulés équilibre en partie l'acidité libérée par l'azote, de sorte que ce produit n'acidifie pas le sol aussi rapidement que ne le fait le nitrate d'ammonium.

Solution de nitrate d'ammonium et d'urée (NAU) (de 28-0-0 à 32-0-0)

- produit de la dissolution de l'urée et du nitrate d'ammonium (50:50) dans l'eau;
- la formulation 28-0-0 peut former un précipité si la température baisse sous les –18 °C (0 °F);
- il existe une solution plus concentrée (32-0-0), mais elle est rarement utilisée en Ontario, car un précipité se forme dès 0 °C (32 °F);
- comme l'urée, la NAU est sujet aux pertes d'ammoniac s'il est appliquée à la surface du sol;
- on y ajoute souvent des herbicides et autres pesticides

destinés à des épandages en pleine surface;
- ne doit pas entrer en contact avec le feuillage, sous peine de le brûler gravement;
- se prête aux épandages en bandes latérales.

La NAU est l'engrais liquide offert sur le marché qui est le plus couramment utilisé en Ontario.

Ammoniac anhydre (82-0-0)

- NH_3;
- produit issu de la réaction du gaz naturel avec l'azote atmosphérique sous des températures et des pressions élevées;
- gaz incolore dégageant une odeur âcre à la pression atmosphérique;
- se manipule comme un liquide sous pression; à –2 °C (28 °F), la pression est la même que celle de l'air ambiant; à 16 °C (60 °F), elle est de 655 kPa (93 lb/po^2);
- constituant de tous les engrais azotés offerts sur le marché;
- effet acidifiant semblable à celui de la NAU (1,8 lb de $CaCO_3$ nécessaire pour neutraliser l'acidité générée par chaque livre de N fournie).

L'ammoniac anhydre est appliqué directement par injection dans le sol où il se vaporise et se dissout dans l'eau du sol. Pour éviter les pertes par vaporisation dans l'air, la bande d'ammoniac anhydre doit être placée à une profondeur suffisante dans le sol afin qu'elle puisse être complètement emprisonnée dans le sol lors de la fermeture de la fente ouverte par l'injecteur.

L'emploi de l'ammoniac anhydre soulève des craintes quant à son innocuité pour les organismes terricoles. À l'intérieur de la bande d'injection, le pH du sol élevé et les conditions hygroscopiques suffisent à tuer les vers de terre et autres représentants de la faune et de la microflore du sol, mais cette zone est relativement petite et le produit se dissipe rapidement. Les populations d'organismes terricoles se rétablissent rapidement et augmentent même par suite de l'ajout d'azote dans l'écosystème du sol.

Petits nuages de vapeur

Vous êtes-vous déjà demandé d'où venaient les petits nuages de vapeur qui apparaissent derrière l'épandeur d'ammoniac anhydre?

À la vue de ces petits nuages, bien des producteurs craignent d'être en train de perdre de grandes quantités d'engrais azoté. En fait, ce qu'ils voient est un brouillard créé par le gaz ammoniac froid qui condense la vapeur d'eau. On estime que chaque millilitre d'ammoniac peut produire plus de un litre de brouillard. En moyenne, les pertes attribuables à ce changement de phase ne sont que de 4 % et sont moins grandes encore sous de bonnes conditions.

TABLEAU 7–1. Ingrédients courants des engrais

	Formule[1] (%)	Autres éléments nutritifs[2]	Indice de salinité[3]	Équivalent de $CaCO_3$[4] (lb/lb de N)	Densité apparente[5] lb/pi³	Densité apparente[5] kg/L	Coût relatif/unité d'élément nutritif[6]
GRANULÉS							
Urée	46-0-0		74	1,8	50	0,80	1,00
Nitrate d'ammonium	34-0-0		104	1,8	56	0,90	1,42
Nitrate d'ammonium et de calcium	27-0-0	4–6 % Ca 0–2 % Mg	93	0,9	68	1,10	1,46
Sulfate d'ammonium	21-0-0	24 % S	88	3,6	68	1,10	1,41–2,04
Nitrate de calcium	15-0-0	19 % Ca	65	–1,3 (B)	75	1,20	3,72
Nitrate de potassium	12-0-44		70	–1,9 (B)	75	1,20	2,54
Nitrate de sodium	16-0-0		100	–1,8 (B)	78	1,25	n.d.
Superphosphate simple	0-20-0	20 % Ca 12 % S	8	neutre	68	1,10	1,77
Superphosphate triple	0-46-0	21 % Ca	10	neutre	68	1,10	1,00
Phosphate monoammonique	11-52-0		27	5,4	62	1,00	0,82
Phosphate diammonique	18-46-0		29	3,6	62	1,00	0,81
Chlorure de potassium (rouge)	0-0-60	45 % Cl	115	neutre	70	1,10	1,00
Chlorure de potassium (blanc)	0-0-62	46 % Cl	116	neutre	75	1,20	1,00
Sulfate de potassium	0-0-50	18 % S	43	neutre	75	1,20	2,34
Sulfate de potassium-magnésium	0-0-22	20 % S 11 % Mg	43	neutre	94	1,50	3,71
LIQUIDES							
Ammoniac anhydre	82-0-0		47	1,8	37	0,6	0,83
Solution de nitrate d'ammonium et d'urée	28-0-0 32-0-0		63 71	1,8	80 82	1,28 1,32	1,10
Solution de polyphosphate d'ammonium	10-34-0 11-37-0		20	3,6	87	1,40	1,27

[1] Formule : concentration minimale garantie en poids d'azote total, d'acide phosphorique biodisponible (P_2O_5) et de potasse soluble (K_2O) dans chaque engrais.

[2] Autres éléments nutritifs : éléments nutritifs autres que N, P ou K.

[3] Indice de salinité : comparaison des solubilités relatives des composés de fertilisation avec le nitrate de sodium (100) en poids de matière. S'ils sont appliqués trop près de la semence ou du feuillage et qu'ils possèdent un indice de salinité élevé, ils risquent davantage de causer des dommages.

[4] Équivalent de $CaCO_3$: livres de chaux nécessaires pour neutraliser l'acide formé par une livre de N fournie par l'engrais. La lettre « B » suivant l'indice de chaulage indique un ingrédient alcalin ou basique (neutralisateur d'acide). Nota : Les effets acidifiants peuvent être jusqu'à deux fois plus élevés que ce qui est indiqué, selon les prélèvements qui sont faits par les végétaux.

[5] Densité apparente : exprimée en livres par pied cube ou en kg/L, il s'agit d'une donnée importante puisque les semoirs et les épandeurs mesurent les engrais en volume plutôt qu'en masse.

[6] Coût relatif/unité : d'après les prix de 2006 de l'urée pour le N, du superphosphate triple pour le P, et du chlorure de potassium pour le K.

Sulfate d'ammonium (21-0-0)

- $(NH_4)_2SO_4$;
- sous-produit industriel cristallin allant du blanc au brun, obtenu par la neutralisation de l'ammoniac dégagé par les fours à coke en présence d'acide sulfurique recyclé, ou issu de la fabrication du nylon;
- peut contenir environ 0,5 % d'eau et d'infimes quantités d'éléments nutritifs tels que potassium, calcium, cuivre, fer, manganèse et zinc;
- revient en général plus cher par unité de N que l'urée.

Le sulfate d'ammonium se décompose en ammonium et en sulfate lorsqu'il est dissous dans l'eau du sol. Il est utile aux épandages en pleine surface, car il comporte moins de risques de volatilisation de l'ammoniac. Selon la source, il est sous forme de granulés ou d'une poudre grossière.

Nitrate de calcium (15-0-0)

- $Ca(NO_3)_2$;
- source d'azote coûteuse;
- utilisé uniquement quand des apports de calcium et d'azote sont nécessaires et qu'il faut éviter l'acidification du sol;
- renferme de l'azote sous forme de nitrate et du calcium hydrosolubles;
- fortement hygroscopique, peut se liquéfier totalement s'il est exposé à l'air sous une humidité relative supérieure à 47 %. Entreposer tout sac ouvert dans un contenant étanche à l'eau hermétiquement fermé.

Hautement solubles, le calcium et l'azote des nitrates sont immédiatement assimilables par les plantes.

Nitrate de potassium (12-0-44)

- KNO_3;
- extrait des lacs salés asséchés (comme la Mer Morte) ou issu de la réaction du chlorure de potassium et de l'acide nitrique;
- source coûteuse de N et de K;
- surtout utilisé dans les cultures horticoles, du tabac ou hydroponiques.

Sources de phosphore (P)

Superphosphate simple (0-20-0)

- constitué à environ moitié-moitié de phosphate monocalcique et de gypse [$Ca(H_2PO_4)_2 \bullet H_2O$ + $CaSO_4 \bullet 2H_2O$];
- issu de la réaction de roches phosphatées avec de l'acide sulfurique;
- contient habituellement 20 % de phosphate assimilable, 12 % de soufre et 20 % de calcium.

Il s'agit de l'engrais commercial le plus ancien, puisque le superphosphate simple est sur le marché depuis 1840. Les principaux fournisseurs d'engrais en Ontario n'offrent plus ce produit, qui est maintenant largement remplacé par le superphosphate triple.

Superphosphate triple (0-46-0)

- constitué essentiellement de phosphate monocalcique [$Ca(H_2PO_4)_2 \bullet H_2O$];
- issu de la réaction de roches phosphatées avec de l'acide phosphorique;
- renferme environ 83 % de phosphate monocalcique, 2 % d'eau, le reste étant surtout des roches phosphatées qui n'ont pas réagi et d'autres phosphates insolubles.

Le phosphate monocalcique est un sel acide qui décompose l'urée assez facilement. On ne doit donc pas le mélanger à de l'urée.

Phosphate monoammonique (PMA; 11-52-0)

- $NH_4H_2PO_4$;
- issu de la réaction de l'ammoniac anhydre avec de l'acide phosphorique;
- couleur allant du blanc cassé au gris;
- renferme habituellement 85 % du composé chimique pur, de 3 à 5 % de phosphate diammonique, 1 % d'eau, le reste étant constitué de magnésium, de sulfates et d'autres phosphates;
- source économique de N (10–12,5 %) et de P_2O_5 (48–52 %).

Le phosphate monoammonique est la source de P privilégiée en Ontario en raison de sa grande valeur fertilisante et de son innocuité relative pour les cultures lorsqu'il est utilisé dans les engrais de démarrage. Il convient bien aux épandages en bandes au départ des cultures.

Phosphate diammonique (PDA; 18-46-0)

- $(NH_4)_2HPO_4$;
- issu de la réaction de l'ammoniac anhydre et de l'acide phosphorique;
- coût unitaire relativement faible;
- couleur allant du gris pâle au gris foncé;
- renferme habituellement environ 80 % du composé chimique pur, 10 % de phosphate monoammonique, de 1–2 % d'eau, le reste étant constitué de magnésium, de sulfates et d'autres phosphates. Peut également contenir une petite quantité de nitrate d'ammonium ou d'urée ajoutée pendant la fabrication pour relever la teneur en azote jusqu'à la concentration garantie, soit 18 %;
- renferme de l'azote à 100 % hydrosoluble et du phosphate assimilable habituellement à 90 % hydrosoluble.

Le phosphate diammonique est la principale source de P depuis plusieurs décennies en raison de son faible coût et de sa forte valeur fertilisante. Il n'est toutefois pas toujours le choix le plus indiqué en raison des risques de dommages par l'ammoniac qu'il comporte pour les cultures lorsqu'il est utilisé comme engrais de démarrage, particulièrement dans les sols alcalins.

Solution de polyphosphate d'ammonium

- $(NH_4)_3HP_2O_7$;
- solution offrant une composition de 10-34-0 (parfois de 11-37-0);
- renferme du P à environ 75 % sous forme de polyphosphate et à 25 % d'orthophosphate;
- issue de la réaction de l'ammoniac avec de l'acide pyrophosphorique, lequel est obtenu par déshydratation de l'acide phosphorique;
- possède un pH de 6, donc presque neutre;
- se mélange bien avec la NAU.

La formule de 10-34-0 se mélange également bien avec des oligo-éléments. Par exemple, elle permet de maintenir une concentration de 2 % de Zn dans la solution comparativement à 0,05 % avec le H_3PO_4.

Phosphate naturel

- roche sédimentaire constituée essentiellement de fluorophosphate de calcium avec impuretés de fer, d'aluminium et de magnésium;
- matière première servant à la fabrication des engrais phosphorés;
- parfois présenté comme étant une source « naturelle » de P;
- le P qu'il renferme n'est pas du tout hydrosoluble;
- de 5 à 17 % du P qu'il contient est soluble dans le citrate;
- s'il est finement moulu, il peut apporter suffisamment de P biodisponible dans les sols à faible pH (acides) lorsqu'il est appliqué à raison de 2 à 3 fois les doses de superphosphates;
- biodisponibilité de faible à nulle dans les sols neutres ou alcalins.

Sources de potassium (K)

Chlorure de potassium (0-0-60 ou 0-0-62)

- symbole chimique : KCl;
- source la plus courante et la moins coûteuse de K;
- contient du chlore (47 %), un élément nutritif essentiel pour les plantes, nécessaire à la division cellulaire, à la photosynthèse et à la suppression des maladies;
- souvent livré avec une petite quantité (moins de 100 grammes par tonne) d'un agent anti-agglomérant à base d'amines ou de pétrole;
- biodisponibilité du K identique pour les formes rouge et blanche.

Chlorure de potassium rouge (0-0-60)

- produit extrait des mines de la Saskatchewan surtout, mais dans une certaine mesure aussi de celles du Nouveau-Brunswick;
- renferme environ 97 % de chlorure de potassium (KCl);
- couleur attribuable aux impuretés de fer; n'influence pas la solubilité.

Chlorure de potassium blanc (0-0-62)

- obtenu par cristallisation du chlorure de potassium issu de l'extraction de la potasse par dissolution;
- chlorure de potassium presque pur.

Sulfate de potassium (0-0-50)

- K_2SO_4;
- extrait de l'eau saumâtre du Grand Lac Salé de l'Utah;
- contient aussi 17 % de soufre sous forme hydrosoluble.

Par rapport au chlorure de potassium, le sulfate de potassium, ou sulfate de potasse, possède un indice de salinité plus faible et coûte plus cher. Il est surtout utilisé sur des cultures sensibles au chlorure, comme le tabac, la pomme de terre, les arbres fruitiers et certains légumes.

Sulfate de potassium-magnésium (0-0-22)

- sulfate de potassium-magnésium $K_2SO_4 \bullet 2MgSO_4$;
- extrait de gisements au Nouveau-Mexique;
- communément désigné K-Mag et Sul-Po-Mag.

Le sulfate de potassium-magnésium coûte plus cher l'unité de K que le chlorure de potassium. Il contient également 11 % de magnésium et 22 % de soufre sous une forme hydrosoluble et donc immédiatement assimilable par les plantes. Il est utile comme source de magnésium soluble dans les champs où le chaulage n'est pas nécessaire.

Solutions claires

- disponibilité sur le marché d'un large éventail d'engrais à base de N-P et N-P-K à pH neutre (voir le tableau 7–2);
- engrais à base de polyphosphate d'ammonium (10-34-0);
- fabriquées par l'ajout au polyphosphate d'ammonium, d'urée, d'ammoniaque, d'acide phosphorique, de chlorure de potassium ou d'hydroxyde de potassium;
- possibilité d'y ajouter des oligo-éléments, pourvu qu'ils soient sous forme de chélates;
- tous les ingrédients doivent être de haute qualité, puisque les impuretés peuvent provoquer le relargage (précipitation en sel) ou la gélification de la solution;
- produit généralement de grande qualité agronomique, bien que les dommages causés par le sel aux semences et aux racines soient à craindre quand les doses de N et de K augmentent;
- utilisées le plus couramment comme engrais de démarrage dans la raie de semis;
- réduction de temps et de main-d'œuvre au moment des semis en raison des faibles doses et de la possibilité de pomper le produit de la citerne au semoir;
- possibilité de réduire les coûts au chapitre du matériel utilisé pour les semis du fait qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser un organe ouvreur distinct pour l'engrais.

TABLEAU 7–2. Mélanges d'engrais liquides

Formule	Poids/ gal US (lb)	Poids/ gal imp. (lb)	Poids/ litre (lb)	Gal imp./ tonne	Gal US/ tonne	Litre/ tonne
8-25-3	11,11	13,35	2,94	165,1	198,4	749,9
6-18-6	10,69	12,85	2,83	171,6	206,2	779,0
3-11-11	10,45	12,55	2,76	175,7	211,0	798,8
9-9-9	10,49	12,60	2,77	175,0	210,2	795,9
7-7-7	10,41	12,50	2,75	176,4	211,8	801,7
6-24-6	11,07	13,30	2,93	165,8	199,2	752,4
9-18-9	11,07	13,30	2,92	165,8	199,2	755,0
5-10-15	10,70	12,85	2,83	171,6	206,0	799,0
2-10-15	10,62	12,75	2,81	172,9	207,6	784,6
10-34-0	11,60	14,00	3,09	157,0	188,5	715,8

1 gallon impérial = 1,201 gallon US — 1 gallon US = 0,8326 gallon impérial
1 gallon US = 3,785 litres — 1 gallon impérial = 4,546 litres

Solutions acides

- combinaisons d'acide phosphorique, d'acide sulfurique et d'urée;
- possibilité d'ajouter des oligo-éléments qui ne sont pas sous forme de chélates.

Les solutions acides ne sont pas très répandues en Ontario parce qu'elles sont corrosives et coûteuses comparativement aux engrais granulaires. Ces solutions sont mises de l'avant en partant du principe que les éléments nutritifs sont plus assimilables aux pH faibles qu'on trouve dans la bande de fertilisation, particulièrement dans les sols alcalins.

La plupart des sols sont toutefois suffisamment tamponnés pour que l'ajout d'acide n'ait aucun effet sur le pH du sol. Ces produits sont aussi bons, mais pas meilleurs, que les autres engrais sur le plan de la biodisponibilité des éléments nutritifs.

Suspensions

- produites par le mélange d'ingrédients secs finement moulus avec de l'eau et un dispersant, par exemple l'argile;
- peuvent donner un engrais complet plus concentré que les engrais dissous;
- nécessité d'agiter le mélange pour le maintenir en suspension et de recourir à du matériel spécial pour la manutention et l'épandage.

Les suspensions constituent une partie quasi-négligeable du marché ontarien des engrais, même s'ils sont d'emploi courant dans l'Ouest canadien.

Sources d'éléments nutritifs secondaires

En Ontario, il arrive que les sols aient besoin d'éléments nutritifs secondaires. Le cas échéant, ils peuvent être ajoutés à un mélange d'engrais ou à la chaux destinée à corriger l'acidité du sol. Le tableau 7–3 présente les sources les plus courantes d'éléments nutritifs secondaires et d'oligo-éléments.

Calcium

La chaux (calcitique ou dolomitique) est la source de calcium plus répandue. Elle amène une élévation du pH des sols acides. Pour être efficace, elle doit être finement broyée. La chaux se vend en poudre ou en granulés obtenus à partir de chaux finement broyée. La solubilité de la chaux chute rapidement à mesure que le pH du sol augmente.

Dans les sols neutres ou alcalins, le gypse (sulfate de calcium) est l'amendement calcaire à privilégier, car il est plus soluble que la chaux. Le gypse n'a aucun effet sur le pH du sol.

Le chlorure de calcium ou le nitrate de calcium servent occasionnellement de sources de calcium pour les pulvérisations foliaires.

Magnésium

Les carences en magnésium s'observent surtout dans les sols acides. Les apports de chaux dolomitique destinés à corriger l'acidité du sol renferment suffisamment de magnésium pour corriger la carence. La chaux dolomitique ne convient pas aux sols alcalins du fait que sa solubilité décroît avec l'augmentation du pH du sol.

Dans les sols neutres ou alcalins, les sels d'Epsom (sulfate de magnésium) ou le sulfate de potassium-magnésium peuvent servir à enrichir le sol de magnésium.

Soufre

Le soufre, sous forme de sulfate, est présent dans un certain nombre d'engrais courants. On peut aussi l'ajouter à un mélange d'engrais. On utilise alors le plus souvent les ingrédients suivants : sulfate d'ammonium, sulfate de potassium et sulfate de potassium-magnésium. Le gypse (sulfate de calcium) peut aussi servir de source de soufre. La disponibilité du produit, les frais de transport et les autres éléments nutritifs nécessaires à la culture détermineront la source de soufre la plus économique.

Le soufre élémentaire granulaire (90 % de S) peut être une autre source de cet élément. Il amène lui aussi une acidification du sol. Le soufre doit être oxydé et transformé en sulfate pour être assimilable par les cultures, ce qui peut prendre plusieurs mois. Comme certains des produits intermédiaires du processus d'oxydation peuvent être toxiques pour les cultures, les épandages de fortes doses doivent se faire en pleine surface plutôt qu'en bandes.

TABLEAU 7–3. Sources courantes d'éléments nutritifs secondaires et d'oligo-éléments

Élément nutritif	Source	Teneur	Autres éléments nutritifs	Application	
				Au sol	Foliaire
Calcium (Ca)	chaux calcitique	22–40 %		*	
	chaux dolomitique	16–22 %	6–13 % Mg	*	
	gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	23 %	19 % S	*	
	chlorure de calcium ($CaCl_2$)	36 %	64 % Cl	*	*
	nitrate de calcium ($Ca(NO_3)_2$)	19 %	15,5 % N	*	*
	chaux granulaire	16–40 %	0–13 % Mg	*	
	poussière de four à ciment	26–32 %	2–9 % K_2O	*	
Magnésium (Mg)	chaux dolomitique	6–13 %	16–22 % Ca	*	
	sels d'Epsom ($MgSO_4$)	9 %	13 % S	*	*
	sulfate de potassium-magnésium	11 %	22 % K_2O 20 % S	*	
Soufre (S)	sulfate d'ammonium	24 %	21 % N	*	
	sulfate de potassium	18 %	50 % K_2O	*	
	sulfate de potassium-magnésium	22 %	22 % K_2O; 11 % Mg	*	
	sulfate de calcium	19 %	23 % Ca	*	
	soufre granulaire	90 %			
Bore (B)	divers produits granulaires	12–15 %		*	
	Solubor	20 %			*
Cuivre (Cu)	sulfate de cuivre	25 %		*	
	chélates de cuivre	5–13 %			
Manganèse (Mn)	sulfate de manganèse	28–32 %			*
	chélates de manganèse	5–12 %			*
Molybdène (Mo)	molybdate de sodium	39 %			*
Zinc (Zn)	sulfate de zinc	36 %		*	*
	oxysulfate de zinc	8–36 %		*	
	chélates de zinc	9–14 %			*

Sources d'oligo-éléments

Puisque les quantités d'oligo-éléments nécessaires et appliquées sont relativement petites, il est important que les applications soient uniformes. Les principales catégories de produits contenant des oligo-éléments sont des granulés destinés à être mélangés à des engrais granulaires, et des liquides ou des poudres solubles destinés aux applications foliaires. La forme à privilégier dépend de l'élément nutritif spécifique ainsi que de la culture et des conditions du sol.

Les oligo-éléments granulaires sont mélangés à d'autres ingrédients des engrais en vue d'être épandus en pleine surface ou de servir d'engrais de démarrage. La compatibilité avec les autres ingrédients est importante, tant sur le plan chimique que sur celui de la granulométrie. Comme nombre d'oligo-éléments sont phytotoxiques en trop grande quantité, il faut éviter la ségrégation des constituants des mélanges.

Oxysulfates

- les oxysulfates sont des combinaisons des formes oxyde et sulfate de l'oligo-élément;
- les sulfates sont beaucoup plus solubles et plus assimilables que les oxydes;
- les oxydes sont beaucoup plus stables dans un produit mélangé;
- les oxydes ne sont que lentement assimilables par les cultures.

Ces produits perdent de leur popularité, car leur biodisponibilité et les gains de rendement qu'ils procurent ne sont pas constants.

Sulfates

- assez solubles;
- tendent à être hygroscopiques et peuvent provoquer des problèmes d'agglutination s'ils sont mélangés à d'autres ingrédients fertilisants.

Malgré ces réserves, leur biodisponibilité constante explique leur présence fréquente dans les mélanges d'engrais.

Oligo-éléments liquides et solubles

Ces produits peuvent être mélangés avec de l'eau et pulvérisés sur le feuillage ou incorporés à des engrais liquides utilisés comme engrais de démarrage.

Chélates

- molécules organiques complexes qui se lient à des ions métalliques et les maintiennent ainsi sous des formes solubles alors qu'ils devraient normalement réagir avec d'autres minéraux pour former des composés insolubles;
- la chélation permet à nombre de ces éléments nutritifs d'être mélangés avec des engrais liquides sans former de précipités insolubles;
- peuvent augmenter la biodisponibilité des éléments nutritifs dans le sol;

- les agents chélateurs les plus souvent utilisés sont l'EDTA et le DTPA;
- d'autres substances organiques (acides humiques, lignosulfonates, glucoheptonates) peuvent se lier à des ions métalliques, mais pas aussi étroitement que les vrais chélates.

Les chélates sont beaucoup plus coûteux que les autres formes solubles d'oligo-éléments. On doit les utiliser avec prudence puisqu'ils peuvent complexifier les minéraux déjà présents dans le sol et aggraver des carences.

Poudres solubles

- la forme d'oligo-éléments destinés aux pulvérisations foliaires la moins coûteuse et celle qui offre la fiabilité la plus constante;
- la plupart de ces poudres exigent un pulvérisateur à même de fournir une bonne agitation de manière à maintenir la poudre en solution;
- il faut un mouillant-adhésif pour que l'élément nutritif passe à travers la cuticule et pénètre dans la feuille.

Produits destinés à améliorer l'efficacité des engrais

Azote

La plupart des produits conçus pour améliorer l'efficacité du prélèvement de l'azote retardent la libération de ses formes solubles, l'ammonium et les nitrates. Ces produits sont de plus en plus utilisés. Selon Hall (2005), les ventes de ces engrais se seraient établies à 120 000 tonnes d'azote en 2003, ce qui représente 1 % du marché total nord-américain des engrais azotés.

Ces produits entrent dans une ou plusieurs des catégories suivantes :

- **Engrais à libération lente ou contrôlée**. Engrais qui contiennent de l'azote sous une forme qui en retarde la biodisponibilité, de sorte que l'azote est assimilable sur une plus longue période que lorsqu'il provient d'engrais ordinaires à base d'ammonium, de nitrates ou d'urée. La libération lente de l'azote peut être obtenue par différents procédés, notamment par des revêtements de polymère ou de soufre, par des occlusions ou par l'incorporation de l'azote dans des composés qui sont insolubles ou qui doivent d'abord être minéralisés avant de libérer l'azote. Voici des exemples : ESN® Polymer Coated Urea 44-0-0, DURATION CR®, Multicote®, NUTRI-PAK®, Osmocote® ou POLYON® Coated Urea. Certains de ces produits sont offerts en différentes formulations qui s'assortissent de vitesses de libération variables. Chaque produit est toutefois conçu pour une application particulière et une culture précise.
- **Inhibiteurs de l'uréase**. Substances qui inhibent l'action hydrolytique exercée par l'enzyme uréase sur l'urée.

L'Agrotain®, qui renferme du N-triamide de l'acide thiophosphorique (NBPT) en est un exemple.

- **Inhibiteurs de la nitrification**. Substances qui inhibent l'oxydation biologique de l'ammonium en nitrate. Le N-Serve® (nitrapyrine) et le DCD (dicyandiamide) en sont des exemples. Le thiosulfate d'ammonium inhibe aussi jusqu'à un certain point la nitrification.
- **Engrais stabilisés**. Un stabilisateur d'azote est une substance qu'on ajoute à un engrais et qui a pour effet de prolonger la période pendant laquelle l'engrais reste sous forme d'urée ou sous forme ammoniacale. Le SuperU®, un engrais à base d'urée renfermant à la fois du NBPT (un inhibiteur de l'uréase) et du DCD (un inhibiteur de la nitrification).

Au terme de recherches menées dans l'Ouest canadien, M^{me} Cynthia Grant (2005) a trouvé sept avantages à l'amélioration de l'efficacité des engrais azotés. Elle estime que ces produits peuvent contribuer à :

- réduire au minimum les concentrations d'azote inorganique dans les sols, ce qui réduit les risques de pertes;
- éviter les investissements en capital dans du matériel spécialisé de mise en place de l'engrais;
- réduire les besoins en main-d'œuvre;
- offrir plus de souplesse dans le choix du moment des épandages;
- éviter les risques de ne pouvoir faire les épandages aux moments appropriés;
- gérer le ratio ammonium: nitrate en fonction des besoins des cultures;
- réduire le bagage de connaissances nécessaires à leur utilisation.

Retarder la libération de l'azote soluble peut présenter des inconvénients si l'utilisation de ces produits n'est pas planifiée avec soin. La plupart des engrais sont offerts sous une forme soluble afin de maximiser leur biodisponibilité. Ce n'est que dans des situations particulières, lorsque les apports dépassent les prélèvements par la culture au cours d'une période raisonnable, que les produits mentionnés plus haut apportent un gain d'efficacité.

Phosphore

Les produits conçus pour améliorer l'efficacité des prélèvements de P empêchent la fixation du P dans le sol. Ces produits comprennent des matières organiques ou humiques et des revêtements de polymère qui réduisent la vitesse de diffusion depuis le granulé jusqu'aux sites de fixation dans le sol. Par exemple, du phosphate monoammonique de formule 11-52-0 enduit d'un copolymère itaconique maléique (AVAIL®) est actuellement commercialisé en Amérique du Nord.

Dans certaines conditions de sol, le ralentissement de la libération du phosphate pourrait éventuellement

réduire les réactions de fixation qui nuisent à l'assimilabilité du P appliqué. Par exemple, Garcia et coll. (1997) ont découvert que le phosphate d'urée ou que le superphosphate triple enduit de lignine a augmenté la biodisponibilité du P dans un sol fixateur de P hautement calcaire, tandis que ni le superphosphate ni le phosphate diammonique non revêtus ne l'ont augmentée. Toutefois, le moment de la libération est un facteur critique pour la plupart des engrais de démarrage. La plupart des grandes cultures ont besoin que du P assimilable soit libéré au profit des plantules dans les quelques semaines qui suivent l'ensemencement.

Certains produits qui inoculent le sol de micro-organismes augmentant la biodisponibilité du phosphore ont été évalués en Ontario. En général, ils ne procureraient pas d'avantages économiques. Par exemple, deux années de recherche sur *Penicillium bilaii* indiquent que l'inoculant serait inefficace à accroître la croissance des jeunes plants et les rendements du maïs (Stevenson, 1994).

Produits destinés à l'agriculture biologique

Bon nombre des produits énumérés ci-dessus ne sont pas homologués pour une utilisation en agriculture biologique. Selon l'Office des normes générales du Canada, les produits utilisés en agriculture biologique pour améliorer la fertilité des sols doivent être d'origine végétale, animale, microbienne ou minérale et peuvent être soumis à des procédés physiques, enzymatiques ou microbiens. Étant donné que la plupart des engrais à base de N, de P et de K subissent certains traitements chimiques, ils sont considérés comme des produits « synthétiques », à l'exception de certaines formulations de phosphate de chaux naturel, de chlorure de potassium, de sulfate de potassium et de sulfate de potassium-magnésium. Pour une liste détaillée des substances autorisées, communiquer avec l'Office des normes générales du Canada.

Mélanges d'engrais

Les premiers engrais mélangés ont fait leur apparition sur le marché il y a plus d'un demi-siècle, mais les formes primitives laissaient beaucoup à désirer. Pendant nombre d'années, les engrais étaient livrés à la ferme en poudres fines conservées dans des sacs de papier. Ces produits avaient tendance à bloquer le dispositif d'épandage ou à s'agglutiner en présence d'humidité.

Dans les années 1950, sont apparus sur le marché ontarien des engrais composés complexes sous une forme granulaire. Chaque granulé de ces engrais contenait l'ensemble des éléments nutritifs. Ces granulés, dont la fabrication réclamait du matériel encombrant et coûteux, ont bientôt été remplacés par les mélanges d'engrais en vrac.

La préparation d'un mélange d'engrais en vrac consiste à mélanger divers engrais granulaires entre eux dans les proportions voulues. En Ontario, cette opéra-

tion s'effectue généralement chez les mélangeurs détaillants établis localement.

Ces exploitants préparent rapidement des mélanges à la carte prêts à être épandus sur les champs. Un mélange à la carte, ou formule-client, s'obtient en mélangeant les divers granulés de façon à obtenir une formulation composée conforme aux recommandations de fertilisation établies pour un champ et une culture donnés.

Les mélanges à la carte sont efficaces pour les raisons suivantes :

- ils fournissent la quantité exacte d'éléments nutritifs nécessaires à la culture;
- ils sont moins susceptibles d'absorber l'humidité et de s'agglutiner pendant l'entreposage;
- ils réduisent au minimum les coûts de fertilisation, puisque ce sont des produits qui ne nécessitent aucun support et qui sont à teneur élevée en éléments nutritifs.

Même si leur coût par tonne peut être plus élevé, leur coût par hectare est moindre. La possibilité de préparer des mélanges offrant différentes teneurs en éléments nutritifs à partir de peu d'ingrédients permet aussi d'économiser sur les coûts d'entreposage.

NE PAS MÉLANGER

- du nitrate d'ammonium avec de l'urée;
- du superphosphate avec de l'urée.

Inconvénients des mélanges

Les mélanges en vrac et plus particulièrement les mélanges à la carte présentent quelques inconvénients. Ainsi, la forte teneur en éléments nutritifs des produits concentrés d'aujourd'hui fait en sorte qu'il est difficile de mesurer de faibles doses d'éléments nutritifs.

Pour certaines applications, il y a des avantages à utiliser des engrais composés où chaque granulé renferme plusieurs éléments nutritifs. Mentionnons à titre d'exemple les engrais de démarrage qui contiennent de petites quantités d'oligo-éléments et les engrais pour pelouses résidentielles. Ces engrais homogénéisés assurent une répartition uniforme de tous les éléments nutritifs et sont pratiques à utiliser. Le seul inconvénient qu'ils présentent, toutefois, est d'être offerts selon des ratios d'éléments nutritifs fixes et d'être par conséquent difficiles à adapter aux besoins révélés par les analyses de sol.

Compatibilité physique et chimique des constituants des mélanges

Les engrais sont généralement compatibles les uns aux autres tant qu'ils demeurent secs.

Il existe pourtant certaines exceptions.

- **Ne pas mélanger de nitrate d'ammonium avec de l'urée**. Si ces deux substances sont mises en présence l'une de l'autre, le mélange est tellement hygroscopique (absorbe tellement l'humidité de l'air) qu'il

devient en un rien de temps une bouillie inutilisable. Il faut prendre des mesures pour éviter l'intercontamination pendant l'entreposage et la manutention. Avant de mettre ensemble deux engrais mélangés, en vérifier les ingrédients pour s'assurer de ne pas mettre en présence du nitrate d'ammonium et de l'urée.

- **Ne pas mélanger de superphosphate simple ou triple avec de l'urée**. Les superphosphates (0-20-0 ou 0-46-0) peuvent réagir avec l'urée, surtout s'ils ne sont pas secs et durs. Si cette réaction s'enclenche, l'urée est dégradée et le mélange devient collant.
- **Épandre dès que possible les mélanges contenant du superphosphate et du phosphate diammonique**. Les superphosphates simples ou triples peuvent réagir avec le phosphate diammonique en présence d'humidité. Le mélange devient alors collant et finit par s'agglutiner.
- **Épandre dès que possible les mélanges contenant des oligo-éléments**. Certains ingrédients des oligo-éléments (particulièrement les sulfates) peuvent absorber l'humidité de l'air.

Importance de l'uniformité dans le calibre des granulés

Lors de la préparation et de l'application de mélanges en vrac, il est de toute première importance que le calibre des granulés soit uniforme. Si leur taille varie, un tri s'opérera lors de leur écoulement dans la trémie; les granulés les plus gros iront vers l'extérieur du tas et les plus petits, vers le centre. Cette ségrégation peut entraîner une forte variation de la composition de l'engrais dans les diverses parties du tas.

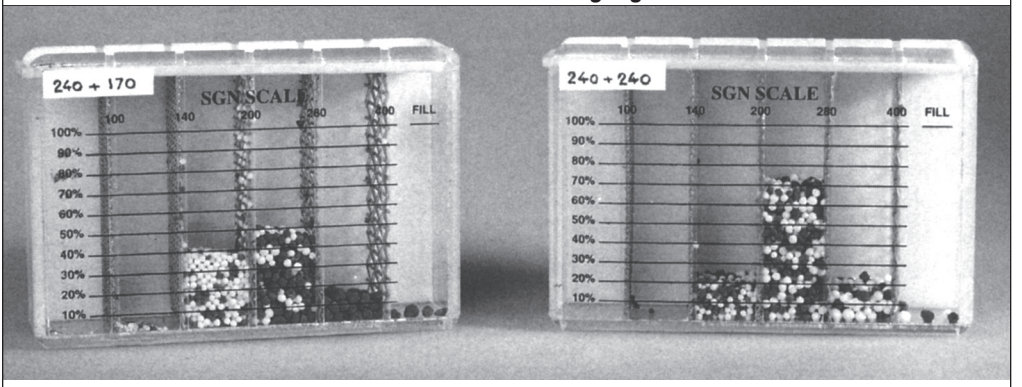
Le calibre des granulés influe également sur le profil d'épandage de l'engrais. Des tests menés par la Tennessee Valley Authority ont permis d'observer une plage de largeurs de travail d'épandage allant de 10,5 m, pour les granulés d'un diamètre de 1,7 mm, à 19,5 m, pour les granulés d'un diamètre de 3 mm. Si les constituants du mélange sont de calibres différents, l'épandage des divers ingrédients ne sera pas uniforme.

Le mélangeur doit donc absolument utiliser des granulés de même calibre. L'Institut canadien des engrais fait la promotion depuis 1986 du système SGN, un système de numérotation qui permet d'identifier le calibre des granulés.

Les numéros du système SGN correspondent au diamètre moyen des granulés, mesuré en millimètres et multiplié par 100. Ainsi, un numéro SGN de 280 signifie que la moitié de l'échantillon d'engrais est retenue par un tamis d'essai d'une ouverture de mailles de 2,80 mm. Le numéro SGN et l'indice d'uniformité, qui mesure l'uniformité du calibre des granulés, sont les deux critères employés pour simplifier le choix de granulés de calibres compatibles.

La figure 7–1 illustre bien la ségrégation qui s'opère quand les

FIGURE 7–1. Test de ségrégation



La boîte marquée 240 + 240 ne révèle aucune ségrégation. La boîte marquée 240 + 170 révèle quant à elle une ségrégation entre les granulés blancs SGN 170 et les granulés gris SGN 240.

granulés ne sont pas de même calibre. Le mélange d'engrais en vrac préparé à partir des ingrédients de la boîte marquée 240 + 170 subira une ségrégation importante dans la trémie à engrais, qui se traduira par une application non uniforme des éléments nutritifs dans le champ.

Établissement des formules

Un mélange à la carte est un produit formulé pour correspondre exactement aux recommandations de fertilisation. La formule n'est rien de plus qu'une recette élaborée à partir des granulés disponibles de manière à fournir aux plantes les éléments nutritifs voulus.

Les mêmes calculs s'appliquent à toute combinaison d'ingrédients, mais la plupart des mélangeurs utilisent une gamme restreinte d'ingrédients. Il s'agit normalement d'une source de N (46-0-0, 27-0-0, etc.), d'une source de P (18-46-0, 11-52-0, 0-46-0, etc.) et d'une source de K (0-0-60, 0-0-62, etc.).

Comme la composition exacte des ingrédients peut varier, selon leur source, il est important de savoir quels sont les ingrédients disponibles. Certains mélangeurs stockent également des ingrédients spécialisés pour certaines cultures comme le tabac.

Une calculatrice est à peu près tout ce qu'il faut pour décider des formules. Le calcul le plus important consiste à déterminer la quantité d'engrais nécessaire pour offrir aux plantes chaque élément nutritif. Pour ce faire, on utilise la proportion de chaque élément nutritif dans l'ingrédient (la proportion étant le pourcentage divisé par 100 — les parties décimales de 1, plutôt que les parties de 100. Ainsi, 46 % devient 0,46). Calculer la quantité d'ingrédients nécessaire en divisant la quantité d'éléments nutritifs requise par la proportion d'éléments nutritifs présents dans l'ingrédient. Un exemple est fourni

à la figure 7–2. On trouve une feuille de calcul vierge à l'annexe A.

Pour calculer les mélanges d'engrais contenant N et P, on procède de la même façon que pour les mélanges N-K ou P-K, si ce n'est qu'on voudra tirer parti des économies possibles offertes par le PDA et le PMA. Il faudra pour ce faire ajouter quelques étapes au processus et calculer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour répondre aux besoins en l'un des éléments nutritifs, puis retrancher des besoins en l'autre élément nutritif l'apport de cet autre élément, procuré par la quantité calculée. Voir la figure 7–3 et l'annexe B.

Le premier calcul effectué dépend du ratio N:P nécessaire et du type de phosphate d'ammonium choisi (PDA ou PMA). En règle générale, on commence par le calcul visant le P s'il s'agit d'un engrais à forte teneur en N (plus d'une partie de N pour deux parties de P). On commence par le calcul visant le N s'il s'agit d'un engrais présentant un ratio N:P de 1:4 et moins. Il existe aussi des logiciels qui facilitent les calculs des mélanges. Par exemple, le Fertilizer Chooser sur le site *http://soilfertility.unl.edu/* détermine les mélanges les plus économiques à partir d'une liste d'ingrédients auxquels correspondent des prix indiqués par l'utilisateur.

Aspects juridiques

L'Agence canadienne d'inspection des aliments surveille et vérifie les engrais et suppléments vendus ou importés au Canada. Le but de la *Loi sur les engrais* et de son règlement d'application est de veiller à ce que les engrais et suppléments soient sans danger, efficaces et annoncés correctement sur le marché.

La plupart des engrais et suppléments sont réglementés, même si l'homologation n'est pas exigée pour tous ces produits. Les oligo-éléments, les engrais-pesticides et les suppléments qui ne figurent pas à l'annexe II du *Règlement sur les engrais* (régulateurs de croissance, amendements de synthèse, agents mouillants, inoculants microbiens, etc.) doivent d'abord être homologués avant d'être importés au Canada et/ou vendus au Canada.

Tous les produits doivent être sans danger pour les plantes, les animaux, les humains et l'environnement. Ils doivent être efficaces et être étiquetés convenablement. L'étiquette d'un engrais ou d'un supplément doit comporter au minimum les éléments d'information suivants : nom, formule (s'il y a lieu), marque (s'il y a lieu), nom et adresse du fabricant ou du détenteur de l'homologation, numéro de lot (s'il y a lieu), numéro d'homologation (s'il y a lieu), composition garantie, mode d'emploi (s'il y a lieu), poids du produit et précautions à prendre. Des éléments d'information supplémentaires peuvent être exigés sur l'étiquette de certains engrais et suppléments de spécialité. La composition des produits doit correspondre à la composition garantie indiquée sur l'étiquette, celle-ci étant sujette à une surveillance et à une inspection.

Bien des fabricants d'engrais et mélangeurs font partie du Programme canadien de contrôle de la qualité des engrais. Dans le cadre de ce programme à participation facultative, les participants prélèvent leurs propres échantillons et les expédient aux laboratoires accrédités transmettent les résultats d'analyse à l'Agence canadienne d'inspection des aliments. Les résultats sont compilés et les fabricants ou mélangeurs qui présentent suffisamment d'échantillons obtiennent une cote. Ces cotes sont publiées annuellement dans le Rapport canadien de vérification de la qualité des engrais, qui est largement diffusé. Un client peut demander de connaître la cote accordée à un fournisseur dans ce rapport.

Pour de plus amples renseignements, communiquer avec le Service des engrais, Agence canadienne d'inspection des aliments, 2, croissant Constellation, Ottawa (Ontario) K1A 0Y9.

Tout engrais doit être convenablement étiqueté, qu'il soit homologué ou non. L'information qui figure sur l'étiquette doit inclure le nom, la formule, la composition garantie, le fabricant, le conditionneur et le poids du produit. Des données supplémentaires sont exigées pour certains types de produits. La composition garantie indiquée sur l'étiquette doit pouvoir être confirmée par d'éventuels contrôles et inspections.

FIGURE 7–2. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-K ou P-K

1. Dresser la liste des ingrédients disponibles et des formules.

Ingrédient	Formule
urée	46-0-0
superphosphate triple	0-46-0
chlorure de potassium	0-0-60

2. Préciser les besoins en éléments nutritifs (ou le ratio ou la formule désirés) :

130-0-90 kg/ha

3. Calculer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour combler les besoins en chaque élément nutritif. Répéter pour chaque élément nutritif.

$$\frac{\text{besoin}}{\text{proportion de l'élément}} \quad \frac{130}{0{,}46} = \text{quantité de l'ingrédient} \quad 283$$

$$\frac{\text{besoin}}{\text{proportion de l'élément}} \quad \frac{90}{0{,}60} = \text{quantité de l'ingrédient} \quad 150$$

$$\frac{\text{besoin}}{\text{proportion de l'élément}} \quad \frac{\qquad}{\qquad} = \text{quantité de l'ingrédient}$$

4. Ajouter le poids des ingrédients et calculer les apports d'éléments nutritifs.

Ingrédient	Poids	N	P_2O_5	K_2O
urée	283	130	0	0
KCl	150	0	0	90
Total	433	130	0	90

Le poids total du mélange à ce point est la dose. Les unités seront les mêmes que pour les besoins initiaux en éléments nutritifs.

5. Calculer la quantité totale d'engrais nécessaire.

dose × superficie du champ	= poids total de l'engrais
433 kg/ha × 20 ha	= 8640 kg

6. Rajuster le poids des ingrédients pour obtenir la formule en kilogrammes/tonne.

Diviser le poids de chacun des ingrédients par le poids total et multiplier par 1000.

Ingrédient	Poids	N	P_2O_5	K_2O
urée	654	301	0	0
KCl	346	0	0	208
Total	1000 kg	301	0	208
Formule (diviser par 10 les totaux N, P et K)		30,1	0	20,8

L'annexe A renferme des formulaires vierges à reproduire et à utiliser.

FIGURE 7–3. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-P-K

1. Dresser la liste des ingrédients disponibles et des formules.

Ingrédient	Formule
urée	46-0-0
phosphate monoammonique (PMA)	11-52-0
superphosphate triple	0-46-0
chlorure de potassium	0-0-60

2. Préciser les besoins en éléments nutritifs (ou le ratio ou la formule désirés) :
90-90-110 lb/ac

3. Calculer la quantité de l'ingrédient (PMA) nécessaire pour combler le besoin en N (ratios de P élevés) ou en P (ratios de N élevés).

$$\frac{\text{besoin}}{\text{proportion de l'élément}} \quad \frac{90}{0{,}52} = \text{quantité de PMA (lb/ac)} \quad 173$$

4. Calculer l'apport de l'autre élément, procuré par la quantité de l'ingrédient calculée.

ingrédient nécessaire x proportion de l'élément = apport $173 \times 0{,}11 = 19$

5. Retrancher du besoin en l'autre élément l'apport de cet autre élément, procuré par la quantité de l'ingrédient calculée, de manière à obtenir le besoin résiduel en l'autre élément.
(Nota : si l'apport est supérieur au besoin, c'est que le calcul fait en premier visait le mauvais élément nutritif. Reprendre à l'étape 3.)

Besoin – apport = besoin résiduel $90 - 19 = 71$

6. Déterminer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour répondre au besoin résiduel (source de N ou source de P).

$$\frac{\text{besoin résiduel}}{\text{proportion de l'élément}} \quad \frac{71}{0{,}46} = \text{quantité de l'ingrédient} \quad 154$$

7. Préciser la quantité de chlorure de potassium nécessaire pour répondre au besoin en K.

$$\frac{\text{besoin en K}}{\text{proportion de l'élément}} \quad \frac{110}{0{,}60} = \text{quantité de l'ingrédient} \quad 183$$

8. Calculer de la même façon tous les ingrédients nécessaires pour chacun des autres oligo-éléments.

9. Ajouter le poids des ingrédients et calculer les apports d'éléments nutritifs.

Ingrédient	Poids	N	P_2O_5	K_2O
PMA	173	19	90	0
urée	154	71	0	0
potasse	183	0	0	110
Total	510	90	90	110

Le poids total du mélange à ce point est la dose. Les unités seront les mêmes que pour les besoins initiaux en éléments nutritifs.

10. Calculer la quantité totale d'engrais nécessaire.

dose × superficie du champ = poids total de l'engrais

510 lb/ac × 40 ac = 20 400 lb (9 251 kg)

11. Rajuster le poids des ingrédients pour obtenir la formule en kilogrammes/tonne.

Diviser le poids de chacun des ingrédients par le poids total et multiplier par 1000.

Ingrédient	Poids	N	P_2O_5	K_2O
PMA	339	37	176	0
urée	302	139	0	0
potasse	359	0	0	215
Total	1000 kg	176	176	215
Formule (diviser le total pour N, P et K par 10)		17,6	17,6	21,5

Il est maintenant possible de calculer le prix de l'engrais.

L'annexe B renferme un formulaire vierge à reproduire et à utiliser.

Application des engrais

L'objectif de tout programme de fertilisation est d'améliorer le rendement et la qualité des cultures en leur procurant les éléments nutritifs dont elles ont besoin. Si l'engrais n'est pas mis en place à l'endroit où les racines peuvent l'atteindre ni quand la culture en a besoin, l'exercice sera vain.

La localisation de l'engrais est une solution de compromis entre l'épandage de l'engrais en concentrations optimales précisément à l'endroit et au moment où les plantes en ont besoin et les considérations pratiques liées au temps et au matériel dont on dispose pour réaliser l'épandage. Si un système d'épandage plus coûteux est envisagé, celui-ci doit, pour compenser, offrir des avantages, par exemple un meilleur rendement ou une réduction du coût des engrais.

La mise en place optimale pour un élément nutritif (ou une combinaison d'éléments nutritifs) en particulier dépend de la mobilité de l'élément nutritif dans le sol, de la concentration nécessaire aux cultures, de sa toxicité à fortes concentrations, de la texture et de l'humidité du sol, ainsi que de la culture visée.

Innocuité pour les cultures

Les tissus végétaux sont sensibles aux blessures infligées par de fortes concentrations salines (pression osmotique) ou l'ammoniac libre (les deux pouvant être le résultat d'une trop grande concentration d'engrais dans un volume de sol trop faible.

Les brûlures causées par les engrais se manifestent par un système racinaire réduit et des zones noircies ou décolorées sur les racines, comme si elles avaient été brûlées. Ce sont les plantules qui en souffrent le plus, du fait de la plus grande sensibilité des tissus jeunes, de la plus grande proportion des tissus qui sont alors touchés et des réserves qui sont moins abondantes et qui aident moins la culture à se remettre des dommages. Sans compter que la croissance demeure plus difficile là où les concentrations d'engrais sont fortes.

Les dommages causés par les engrais sont d'abord et avant tout le fait de concentrations trop fortes plutôt que de quantités totales épandues. Les engrais épandus en bandes sont plus susceptibles d'infliger des blessures que les engrais épandus en pleine surface.

Si l'engrais est épandu avec un semoir à maïs dans une bande de 2,5 cm sur des rangs espacés de 0,75 m, la concentration dans la bande est 30 fois supérieure à ce qu'elle aurait été si l'engrais avait été épandu en pleine surface. De plus, la distribution le long des rangs n'est pas toujours uniforme, de sorte que la dose peut être beaucoup plus élevée à certains endroits.

La concentration peut être diluée si l'engrais se répand à l'extérieur de la bande, mais l'ampleur de la dilution dépend de la texture et de l'humidité du sol. Dans les sols humides, la dilution est plus forte. Les brûlures causées par les engrais

sont fréquentes les printemps secs et dans des sols bien drainés à texture grossière. Comme les sols à texture grossière à faible teneur en matière organique offrent une moins grande surface de réaction avec l'engrais et d'adsorption de celui-ci, la concentration dans la solution de sol demeurera plus élevée que dans les sols argileux.

La proximité des semences ou des plants repiqués avec la bande fertilisée augmente aussi le risque de brûlure. Si l'engrais est trop proche, il a peu de chances d'être dilué par l'eau du sol. Les racines elles-mêmes ont peu de chances, sinon aucune, de croître au delà de la zone de concentration. L'azote et le potassium, plus particulièrement, peuvent être nocifs pour les plantules et nuire à la germination des semences. Dans les sols froids, peu propices à la croissance racinaire, les effets peuvent être amplifiés.

Si l'engrais est épandu en bandes dans la raie de semis, la dose sécuritaire est bien inférieure à celle d'un engrais épandu en bandes à 5 cm sur le côté et à 5 cm au-dessous des semences. Même aux doses recommandées, l'engrais épandu dans la raie de semis ralentit légèrement la germination et la levée, car le sel ralentit l'absorption de l'eau. L'épandage de l'engrais dans la raie de semis ne convient pas à toutes les cultures.

Des dommages par le sel sont à craindre quand la concentration d'ions dans la solution de sol est supérieure à celle qu'on trouve à l'intérieur de la plante. L'eau est alors attirée à travers la membrane cellulaire, hors de la racine. Les tissus de la racine sont endommagés par dessiccation et semblent avoir été brûlés légèrement par de l'air chaud.

Tout composé soluble en concentration suffisamment forte entraînera des dommages causés par le sel. Plus un engrais est soluble, plus le risque de dommages par le sel est grand. Les acides et les hydroxydes risquent un peu moins de causer de tels dommages, mais ces ingrédients, tels qu'ils sont utilisés dans la fabrication des engrais, sont combinés à des composés solubles avant l'épandage.

L'ammoniac peut causer des dommages aux tissus quand on retrouve de l'ammoniac libre dans la solution de sol. Normalement, ce composé se dissout en ions ammonium, mais à fortes concentrations, et plus particulièrement dans des conditions d'alcalinité, une partie de l'ammonium se trouve libérée en ammoniac. Cette situation peut se produire au moment des épandages d'ammoniac anhydre ou de fortes doses de fumier liquide ou si l'urée ou le phosphate diammonique (PDA, 18-46-0) est épandu en bandes près du rang. Les symptômes de dommages par l'ammoniac sont analogues à ceux qui sont causés par le sel et sont souvent concomitants.

Les cultures ne sont pas toutes également sensibles aux dommages causés par les engrais. De façon générale, les graminées (monocotylédones) y sont beaucoup moins sensibles que les cultures à feuilles larges (dicotylédones). Parmi les

graminées, les céréales sont plus tolérantes que le maïs aux fortes doses d'engrais épandus en bandes. Chez les dicotylédones, le soya et les haricots comestibles sont plus sensibles que les légumineuses fourragères ou le canola, mais toutes ces cultures demeurent beaucoup plus sensibles que le maïs.

En règle générale, les légumes semés sont assez sensibles aux dommages causés par les engrais.

Le tableau 7–4 indique les doses d'engrais maximales jugées sécuritaires.

Méthodes d'application

Épandage en plein ou en pleine surface

L'épandage en pleine surface est de loin la méthode la plus rapide et la moins coûteuse. L'engrais est épandu uniformément à la surface du sol, puis, dans la plupart des grandes cultures, est incorporé au sol. Cette façon de procéder offre la meilleure dilution possible et réduit du coup les risques de brûlures par les engrais. Elle peut cependant nuire au prélèvement des éléments nutritifs, comme le phosphore, si la concentration de l'élément joue un rôle critique dans le prélèvement des éléments nutritifs par un petit système racinaire. L'épandage en pleine surface a aussi l'avantage de maximiser le contact entre l'engrais et le sol, d'où une immobilisation plus rapide des éléments nutritifs dans le sol, comparativement à l'épandage en bandes.

Les brûlures par les engrais peuvent quand même se produire dans des sols très sableux à faible teneur en matière organique. L'application sur ces sols de fortes doses d'urée et de potasse peut endommager les plantules par temps sec, surtout si l'application se double de l'épandage d'un engrais en bandes ou dans la raie de semis.

Dans le cas des engrais granulaires, que l'épandeur soit tracté ou automoteur, il existe deux types d'organe de dispersion : il peut être centrifuge ou pneumatique (jet d'air). L'un et l'autre donnent de bons résultats pour peu que l'appareil soit opéré et entretenu correctement.

Épandeurs centrifuges

Dans le cas des épandeurs centrifuges, l'engrais est dispersé par des pales de projection installées sur un ou deux disques tournant à grande vitesse. Il est important que le calibre des granulés soit uniforme, car une petite particule n'étant pas projetée aussi loin qu'une grosse, l'épandage risquerait autrement d'être inégal. L'uniformité de l'épandage peut être compromise si les conditions sont venteuses ou s'il y a accumulation d'engrais dans le distributeur ou sur les pales. Même si des nettoyages fréquents s'imposent, les parties à nettoyer sont facilement accessibles.

Les épandeurs centrifuges sont passablement simples sur le plan mécanique et relativement peu coûteux. La puissance nécessaire est modeste : tout tracteur capable de tirer l'épandeur dispose de

TABLEAU 7–4. Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs

La surfertilisation peut endommager les plantules par l'action de l'ammoniac et du sel. Ces dommages sont attribuables aux teneurs en azote (N) et en potassium (K) de l'engrais. La toxicité varie considérablement selon la texture du sol, les conditions d'humidité, la culture, la source d'engrais et la mise en place de l'engrais. Le présent tableau fournit des lignes directrices qui devraient limiter les dommages à moins de 10 % des cas où elles sont utilisées. Les dommages comprennent une réduction de la germination ou un retard dans la germination ou la croissance. Les conditions météorologiques, les facteurs de stress et autres conditions qui influencent la croissance peuvent augmenter les risques de dommages.

Avoine et orge du printemps (engrais avec la semence)		**N (kg/ha)**	**N + K_2O (kg/ha)**
Sables, loams sableux	Urée (46-0-0) :	10	30
	Phosphate diammonique (18-46-0) :	20	35
	Autres engrais :	35	55
Loams, limons, loams argileux	Urée (46-0-0) :	10	30
	Phosphate diammonique (18-46-0) :	30	55
	Autres engrais :	45	70
Triticale, orge ou blé d'automne (engrais avec la semence)			
Tous les sols	Urée (46-0-0) :	0 (automne)	0 (automne)
	Phosphate diammonique (18-46-0) :	0 (automne)	0 (automne)
	Autres engrais :	15	30
Maïs (engrais en bandes avec la semence)			
Tous les sols	Urée (46-0-0) :	0	0
	Phosphate diammonique (18-46-0) :		0
	Autres engrais — rangs écartés de 100 cm :		7
	— rangs écartés de 75 cm :	0	10
	— rangs écartés de 50 cm :		14
Le maïs sucré peut être plus sensible à l'engrais placé avec la semence. Ne pas épandre d'engrais avec la semence dans le cas des hybrides de maïs super sucré.			
Maïs (engrais en bandes à 5 cm sur le côté et 5 cm sous la semence)			
Tous les sols	Urée (46-0-0) :	39	60
	Autres engrais :	55	90
Si les doses sont plus fortes, éloigner la bande d'au moins 15 cm de la semence. Pour les distances entre les rangs autres que 100 cm, rajuster la dose de manière à conserver la même concentration maximale dans le rang (par exemple, dans des rangs écartés de 50 cm, la dose sécuritaire est de 100/50 × 55 = 110 kg de N/ha).			
Maïs (engrais en pleine surface)			
Sables, loams sableux	Urée (46-0-0) :	200	250
Canola (engrais avec la semence)			
On peut injecter jusqu'à 20 kg d'engrais phosphaté/ha avec la semence sous forme de superphosphate ou de phosphate monoammonique. Ne pas épandre de N (sauf le phosphate monoammonique) ni de K avec la semence.			
Lin (pas d'engrais avec la semence)			
Les doses recommandées sont normalement sécuritaires pour les épandages en pleine surface.			
Pois, haricots et soya (pas d'engrais avec la semence)			
Tous les sols (engrais en bandes à 5 cm sur le côté et 5 cm sous la semence) :		30	90
Les engrais dont la teneur en N représente plus de la moitié de la teneur en P_2O_5 (p. ex. 16-16-16) renferment souvent de l'urée. Bien souvent, les engrais qui renferment de l'urée ne se prêtent pas à l'épandage en bandes à l'ensemencement.			

suffisamment de puissance pour les organes rotatifs. Les épandeurs centrifuges sont ceux qu'on trouve le plus souvent dans les centres de location, en raison de leur faible coût, de leur fonctionnement habituellement sans problème et de la facilité avec laquelle ils peuvent être réparés au champ.

Épandeurs pneumatiques

Dans les épandeurs pneumatiques, un jet d'air à forte vélocité fait circuler les granulés le long d'une rampe jusqu'aux distributeurs espacés d'environ 1,7 m. Ces épandeurs ont besoin de plus de puissance, car le ventilateur qui crée le flux d'air tourne à grande vitesse. Ces épandeurs sont également plus complexes en raison des pièces mobiles dans le ventilateur et du système de mesure qui distribue l'engrais uniformément à chacune des sections de rampe.

Toutefois, le dosage peut être plus précis que dans les épandeurs centrifuges et le mélange qui s'effectue dans le flux d'air permet d'ajouter de petites quantités d'herbicides granulaires ou d'oligo-éléments.

Les distributeurs étant relativement rapprochés, le vent influence moins la qualité d'épandage que dans le cas des épandeurs centrifuges. Les appareils automoteurs offrent souvent une largeur de travail d'épandage plus grande que les épandeurs centrifuges, ce qui procure un plus grand débit pour la même unité de puissance. Il est rare que la machine se bloque, en raison de la grande vitesse du flux d'air, mais l'épandeur doit être surveillé davantage si le temps est humide ou que les granulés le sont.

Étant relativement coûteux et complexes, les épandeurs pneumatiques ne conviennent généralement pas à l'usage qu'en font les particuliers. Ils n'en sont pas moins le premier choix des entreprises d'épandage à forfait.

Système Tru-Spread

Le système Tru-Spread fait appel à un convoyeur à vis sans fin qui achemine l'engrais granulaire sur la largeur de la rampe et le laisse tomber par des ouvertures espacées de 17,5 cm. Il procure un dosage assez précis et la qualité du travail n'est pas influencée par le vent.

Matériel de pulvérisation

Les engrais destinés aux épandages en pleine surface sont la plupart du temps des engrais granulaires, mais il arrive souvent qu'il s'agisse d'engrais azotés liquides. Ceux-ci doivent être épandus à l'aide de pulvérisateurs comme dans le cas des herbicides. Les solutions d'azote peuvent d'ailleurs servir de support aux herbicides épandus, ce qui permet de faire d'une pierre deux coups.

Les pulvérisateurs procurent habituellement un épandage uniforme, mais ils obligent à composer avec les risques de dérive par temps venteux. Certaines pulvérisateurs ne donnent pas d'aussi bons résultats lorsqu'ils servent à épandre des engrais liquides parce qu'ils ne sont pas conçus pour gérer de gros volumes ou subissent la corrosion

causée par certains constituants des engrais.

Fertilisation à dose variable

Les épandeurs d'engrais à dose variable les plus simples sont les épandeurs traditionnels qui, quel qu'en soit le type, sont munis d'un récepteur GPS et d'une liaison au contrôleur. Ces dispositifs permettent d'épandre des doses variables de l'engrais ou du mélange d'engrais. Il arrive que plusieurs passages soient nécessaires pour répondre aux besoins en engrais. Toutefois, le matériel est moins coûteux que les épandeurs à dose variable à multitrémies. La nécessité de faire plusieurs passages a pour effet de ralentir les opérations et d'accroître le compactage du sol.

Dans le cas des épandeurs à dose variable à multitrémies, chaque trémie peut être commandée individuellement. Il est ainsi possible en un même passage d'appliquer jusqu'à neuf produits suivant des doses variables. Les trémies peuvent contenir des engrais ainsi que des produits chimiques granulaires.

L'épandage de la chaux à dose variable peut se faire soit à l'aide d'une chauleuse munie d'un récepteur GPS et d'une commande de variation des doses, soit à l'aide d'une chauleuse traditionnelle dont on modifie le taux d'application dans chacune des zones préalablement marquées à partir d'une carte de sol.

Épandage en bandes

L'épandage en bandes consiste à épandre l'engrais sur une bande à côté et au-dessous des semences, dans le cas des cultures en rangs, ou avec les semences, dans le cas des céréales. Ce type d'épandage nécessite l'installation sur le semoir en lignes ou le semoir de précision de trémies et de dispositifs de dosage et d'un organe ouvreur supplémentaire destiné à la mise en place de l'engrais. L'ajout de tout ce matériel qui alourdit le semoir peut nécessiter une plus grande puissance de remorquage. Le remplissage des trémies ralentira par ailleurs les semis.

L'épandage en bandes a l'avantage de localiser une forte concentration d'engrais là où il pourra être intercepté par les racines des jeunes plants. Cette proximité est particulièrement importante dans le cas du phosphore, qui est nécessaire au début de la croissance de nombreuses cultures.

La prudence est de mise avec l'épandage en bandes, car de fortes concentrations augmentent les risques de brûlures. Il faut limiter les doses d'azote et de potassium, surtout si de l'urée ou du phosphate diammonique constitue la source d'azote. Le pH du sol dans la bande de fertilisation influence aussi la biodisponibilité d'autres éléments nutritifs dans le sol. Voir la rubrique *pH du sol dans les bandes d'engrais de démarrage* au chapitre 4, p. 102.

Il est aussi très important de bien régler le semoir de manière à déposer l'engrais à la bonne distance des semences. Si les organes ouvreurs

viennent trop près de la raie de semis, les risques de brûlures augmentent. Si les organes ouvreurs s'en écartent trop, les plantules risquent de ne pas pouvoir intercepter assez tôt l'engrais.

Les dispositifs de dosage destinés à l'épandage en bandes sont assez simples; une vis sans fin située au fond des trémies laisse tomber l'engrais par une ouverture réglable. On peut faire varier la dose par la vitesse de rotation de la vis, le réglage de l'ouverture et l'inclinaison du plan de la vis. Il faut vérifier soigneusement l'alignement de la vis d'alimentation. Si elle est déportée d'un côté, elle peut laisser tomber jusqu'à 50 % plus d'engrais de ce côté de la trémie que de l'autre côté.

Épandage de l'engrais en contact avec la semence

L'engrais peut aussi être épandu directement avec la semence (technique désignée *pop-up* en anglais), même s'il retarde alors légèrement la germination. Cette méthode offre l'avantage de fournir des gains de rendement relativement élevés dans le maïs (jusqu'à 8 boisseaux/acre selon une étude) avec de faibles doses d'engrais, même dans les sols affichant des niveaux de fertilité élevés pour lesquels on ne s'attendrait à aucun gain de rendement d'épandages en bandes ou en plein. Cette méthode assure également une augmentation constante de la vigueur des plantules.

En raison de l'étroite proximité de l'engrais et de la semence, cette méthode est celle qui comporte le plus de risques de brûlures par l'engrais. Il est donc primordial de ne pas dépasser les doses maximales sécuritaires et de veiller à ce que le matériel épande l'engrais uniformément. Une distribution de l'engrais par à-coups peut facilement entraîner une croissance erratique des cultures, en privant d'engrais certains segments de rangs et en en surfertilisant d'autres.

Les engrais ainsi épandus sont surtout liquides, car ils sont faciles à doser avec précision et à manipuler. Pour éviter les à-coups, l'engrais doit être acheminé sous pression aux organes ouvreurs et dosé à travers un orifice. Il faut veiller à ce que le tube de distribution soit bien centré sur l'organe ouvreur. Si des gouttes d'engrais liquide tombent sur les disques ouvreurs, il se formera de la boue qui obstruera les orifices.

Certains agriculteurs font l'expérience de convertir leurs distributeurs d'insecticides afin qu'ils servent à l'épandage d'engrais granulaires. Ils cherchent ainsi à tirer parti des avantages de l'épandage avec les semences, sans les coûts élevés associés aux engrais liquides. La conversion les oblige à remplacer le cylindre de plastique du distributeur d'insecticides par un cylindre d'acier et à positionner le tube de distribution dans l'ouvreur de sillon. Bien que les premiers résultats soient encourageants, on s'inquiète de l'uniformité de l'épandage et de la capacité des distributeurs d'insecticides à résister à la manutention d'engrais, qui sont beaucoup plus denses que les insecticides.

Épandage en bandes latérales

L'épandage en bandes latérales consiste à épandre l'engrais, surtout l'azote, entre les rangs de la culture. Cette méthode permet de faire les apports d'azote à un moment qui coïncide avec celui où la culture en a besoin, ce qui augmente l'efficacité de l'utilisation de l'azote. L'épandage en bandes latérales réduit par ailleurs le risque de lessivage de l'azote dans les sols sableux ou le risque de dénitrification dans les sols mal drainés.

Dans les cultures de maïs, l'azote épandu en bandes latérales est le plus souvent sous forme d'ammoniac anhydre et de solution de nitrate d'ammonium et d'urée (NAU).

La forme anhydre est intéressante du fait de son faible coût par unité d'azote et du fait également que dans les sols argileux du sud-ouest de l'Ontario, elle procure un avantage sur le plan de rendement par rapport à d'autres formes d'azote. Sous cette forme, il faut injecter l'azote à une profondeur suffisante dans le sol, afin de permettre à la fente d'injection de se refermer et d'éviter ainsi que trop d'azote ne s'échappe dans l'atmosphère. L'épandage d'ammoniac anhydre nécessite davantage d'énergie, coûte plus cher et oblige à prendre des précautions pour pouvoir se faire en toute sécurité.

Comme les solutions de NAU n'ont pas à être injectées profondément dans le sol, leur application ne s'assortit pas de besoins importants en énergie. En présence d'une épaisse couche de résidus à la surface du sol, la solution doit être placée sous la couche de résidus afin d'éviter les pertes d'ammoniac par volatilisation. Malgré son coût relativement élevé, la NAU est largement utilisée, du fait de sa sécurité d'utilisation et de sa facilité de manutention.

Si les résidus de culture sont abondants, les couteaux injecteurs risquent de s'y accrocher et de les traîner. Pour remédier à cette situation, les épandeurs conçus pour le semis direct sont pourvus de coutres qui découpent les résidus et améliorent la pénétration du produit dans la terre ferme. D'autres épandeurs possèdent des injecteurs dotés de roues à dents qui permettent à la solution de pénétrer dans le sol en dérangeant très peu les résidus. Cette technologie donne d'assez bons résultats, mais coûte au départ plus cher que les autres types d'épandeurs en bandes latérales.

Les engrais granulaires sont utilisés pour la fertilisation en bandes latérales des cultures légumières et du tabac, mais ne sont pas très utilisés dans la culture du maïs. Il est aussi facile de se procurer ces engrais que les engrais sous les formes liquide ou gazeuse.

Épandage en bandes en profondeur

Certains producteurs épandent les engrais à base de phosphore et de potassium en bandes, à une profondeur de 15–20 cm, surtout là où ils pratiquent le semis direct et la culture sur billons dans des sols fermes. Ils espèrent ainsi s'assurer

d'une plus grande biodisponibilité des engrais en période de sécheresse et éviter la fixation des éléments nutritifs dans le sol. Jusqu'ici toutefois, le peu d'essais menés en Ontario n'ont pas fait ressortir d'avantage en termes de rendement à l'épandage en bandes en profondeur. Il reste que ce type d'épandage peut être utile dans certaines situations.

Apport d'engrais de démarrage au moment du repiquage

Le matériel repiqué tirera parti d'éléments nutritifs facilement assimilables qui favoriseront la reprise de la croissance racinaire et aideront les plants à se remettre du choc de la transplantation. Autrement, chez les jeunes plants, les racines mettront du temps à pousser et à investir le sol à la recherche d'éléments nutritifs. Les plants repiqués reçoivent l'engrais de démarrage à même l'eau d'arrosage employée au moment du repiquage ou avant la mise en place au champ.

Les solutions sont obtenues à partir d'engrais hydrosoluble ou d'engrais liquides qui procurent une source d'éléments nutritifs à la masse racinaire. Ces solutions renferment toujours du phosphore, qui est important pour le développement des racines, et peuvent aussi renfermer de l'azote et du potassium. Voici des exemples d'engrais de démarrage : 10-52-10, 6-24-6 et 10-34-0.

Les solutions de démarrage sont particulièrement importantes lorsque le sol est froid. En effet, les sols froids inhibent la croissance racinaire et, par conséquent, le prélèvement des éléments nutritifs du sol.

Applications foliaires

Les engrais foliaires peuvent être un excellent complément aux engrais appliqués au sol. Ils peuvent remédier rapidement à des carences et ne risquent pas de se fixer aux particules de sol. En revanche, ils risquent d'être emportés par l'eau ou de voir le support s'assécher avant que l'élément nutritif ne soit absorbé. L'utilisation de mouillant-adhésif peut accroître l'absorption de l'engrais par la cuticule.

À faibles doses, ces engrais ne risquent pas d'endommager les tissus. Par conséquent, il est plus facile de corriger des carences en oligo-éléments, quand il s'agit de quelques grammes seulement par hectare, que de corriger des carences en macro-éléments nutritifs.

Même si l'urée est la source d'éléments nutritifs la plus facilement assimilable par les feuilles, il en faut souvent de nombreuses applications pour que les effets de l'apport d'azote soient manifestes. Pour cette raison, l'application foliaire de macro-éléments nutritifs a tendance à se justifier davantage dans les cultures horticoles de grande valeur que dans les grandes cultures courantes.

Dans le cas des oligo-éléments, par contre, les pulvérisations foliaires sont souvent la solution la plus économique, quelle que soit la culture. Elles sont le moyen le plus efficace de remédier à une carence en manganèse. Bien lire les éti-

quettes des produits utilisés avant de mélanger des engrais foliaires avec des bouillies pesticides. L'antagonisme du manganèse et du glyphosate notamment est bien connu.

Les applications foliaires d'urée donnent de bons résultats dans bien des cultures. L'azote provenant de l'urée peut être appliqué sur les feuilles à des concentrations beaucoup plus grandes que le phosphore et le potassium. Choisir une formule compatible avec l'alimentation des animaux ou des usages foliaires, car la teneur en biuret est alors moins élevée et ne risque pas d'endommager les tissus végétaux. On dispose de peu de données de recherches sur les doses maximales sécuritaires, mais selon certaines études, la dose à ne pas dépasser pour une seule application foliaire d'urée serait de 20 lb de N/acre à raison d'une concentration dans la bouillie inférieure à 2 %.

Fertirrigation

La fertirrigation est une forme spécialisée de fertilisation en pleine surface dans laquelle l'engrais est injecté dans l'eau d'irrigation. Cette méthode permet à l'exploitant de nourrir sa culture à faibles doses au fur et à mesure que celle-ci a besoin d'éléments nutritifs. Le coût du matériel de dosage et d'injection est faible relativement au coût du système d'irrigation. Par ailleurs, le matériel est assez simple et fiable.

Les engrais, par contre, peuvent être assez coûteux, puisqu'il s'agit d'engrais liquides qui sont ajoutés au système d'irrigation. La fertirrigation présente aussi l'inconvénient de distribuer l'engrais aux mêmes endroits que l'eau, ce qui risque de ne pas donner un épandage uniforme. Si l'on opte pour la fertigation avec l'irrigation goutte-à-goutte, il faut veiller à éviter l'obstruction des goutteurs.

Combinaison de méthodes

Le choix de l'engrais de démarrage dépend de la culture, des besoins en minéraux et du matériel disponible. Il est souvent aussi efficace d'épandre une partie de l'engrais au démarrage de la culture et d'épandre le reste en pleine surface que d'épandre tout l'engrais à l'ensemencement. Les épandages fractionnés offrent certains avantages, notamment des économies de temps et de main-d'œuvre et la diminution des risques de voir les engrais endommager les plantules.

Il faut déduire les apports de minéraux procurés par les engrais de démarrage et les engrais épandus en bandes latérales des besoins totaux en minéraux. Ce qui reste doit être épandu en pleine surface. S'il reste très peu d'engrais à épandre, il est peut-être justifié de rajuster les doses de l'une des autres sources d'éléments nutritifs, d'oublier carrément la quantité manquante ou d'envisager une application d'engrais destinée à répondre aux besoins sur plusieurs années (dans le cas du P et du K uniquement).

Feuille de calcul relative aux applications d'engrais

Une fois les besoins des cultures établis, il reste à déterminer de quelle façon combler ces besoins. Pour des raisons économiques et environnementales, il importe d'utiliser au mieux toutes les sources d'éléments nutritifs, autant les sources organiques produites à la ferme que les sources importées et les engrais minéraux.

Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs

Quelle que soit l'élément nutritif, ne jamais dépasser la dose maximale sécuritaire, afin d'éviter les dommages aux cultures. Les doses indiquées dans le tableau 7–4 peuvent entraîner l'apparition de symptômes de dommages ou des retards de croissance dans un maximum de 10 % des cas. Dans la mesure du possible, utiliser des doses moindres. Comme des dommages aux cultures sont à craindre quand les doses d'engrais sont trop fortes, le manque d'uniformité dans l'épandage peut causer des dommages par endroits même si la dose moyenne est suffisamment faible pour être sécuritaire.

La question de savoir quelles sont les doses sécuritaires dépend beaucoup de la dilution. Les dommages sont surtout observés par temps sec et dans des sols à texture grossière pauvres en matière organique.

Si les rangs sont plus étroits, la dose sécuritaire sera plus grande, car la même quantité d'engrais est alors épandue sur une plus grande longueur de rang.

Pour prévenir les dommages par les engrais, il est important de bien entretenir le matériel. Si l'organe ouvreur de l'injecteur se déplace plus près des semences, une dose qui serait autrement sécuritaire risque de brûler les semences ou les plantules.

Source d'engrais et mise en place de l'engrais

Utiliser d'abord les sources d'éléments nutritifs produites à la ferme, car elles seront de toutes façons épandues sur les champs. Déterminer les taux d'application de manière à répondre aux besoins en azote ou en phosphore.

De nombreux producteurs trouvent avantageux de fractionner les besoins en éléments nutritifs entre des sources organiques et minérales. Ils se prémunissent ainsi contre la variabilité dans les épandages de fumier tout en tirant parti d'une source économique d'éléments nutritifs. Des éléments nutritifs de source organique mais non agricole, comme les biosolides d'épuration, peuvent être envisagés.

Les engrais chimiques servent à répondre aux besoins des cultures qui ne sont pas comblés par d'autres sources d'éléments nutritifs. Épandre les engrais chimiques aussi près que possible du moment où la culture a besoin des éléments nutritifs et aussi près du plant que possible.

Recommandations de fertilisation et calcul des doses

La figure 7–4 donne un exemple de feuille de calcul utilisée pour déterminer les doses d'engrais. Voir l'annexe C pour une feuille de calcul vierge à reproduire.

Inscrire sur la ligne supérieure les besoins en N, P_2O_5 et K_2O. Déduire les éléments nutritifs fournis par les légumineuses, le fumier et d'autres sources organiques afin de préciser la quantité d'engrais minéraux nécessaire pour répondre aux besoins totaux.

Cette feuille de calcul se prête à des calculs en unités métriques ou en unités impériales.

FIGURE 7–4. Feuille de calcul relative aux applications d'engrais

Culture prévue	maïs
Culture précédente	orge avec trèfle rouge
Fumier épandu (type, quantité)	fumier solide de bovins laitiers (10 t imp./ac) incorporé au sol au printemps
Autres sources organiques d'éléments nutritifs	aucune
Engrais de démarrage (dose, formule)	(140 lb/ac) 8-32-16
Azote supplémentaire (dose, formule)	aucun

	N	P_2O_5	K_2O
Besoins (lb/ac)[1]	140	45	72
moins légumineuses	40	0	0
moins fumier	30	30	140
moins biosolides d'épuration	0	0	0
Besoins totaux en engrais minéral	70	15	0
moins engrais de démarrage	11	44	22
moins engrais épandu en bandes latérales	0	0	0
Besoins totaux en engrais épandu en pleine surface	59	0	0

Dans cet exemple, les besoins totaux en engrais épandu en pleine surface sont de 59 lb de N/ac ou 128 lb d'urée/ac. On aurait aussi pu réduire la quantité d'engrais de démarrage.

Si on a besoin d'un mélange plus complexe, on peut le calculer à l'aide de la figure 7–2, *Feuille de calcul des mélanges d'engrais*, p. 199.

[1] Besoins totaux de la culture. Vérifier si les légumineuses et les fumiers sont déjà pris en compte dans les recommandations.

Bibliographie

California Plant Health Association, 2002. *Western Fertilizer Handbook*, 9th ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.

California Fertilizer Association, 1998. *Western Fertilizer Handbook, 2nd Horticulture Edition*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.

Follet, R. H., Murphy, L. S. et Donohue, R. L., 1981. *Fertilizers and Soil Amendments*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.

Follet et coll. *Farm Chemicals Handbook*. Willoughby, Ohio. Meister Publishing Company.

Frye, W., 2005. *Nitrification Inhibition For Nitrogen Efficiency And Environment Protection*. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany, 28–30 June 2005.

Garcia, M.C., J.A. Diez, A. Vallejo, L. Garcia, M.C. Cartagena, 1997. *Effect of applying soluble and coated phosphate fertilizers on phosphate availability in calcareous soils and on P absorption by a rye-grass crop*. J. Agric. Food Chem. 45 (5) 1931–1936.

Grant, Cynthia, 2005. *Policy aspects related to the use of enhanced efficiency fertilizers: Viewpoint of the scientific community*. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany, 28–30 June 2005.

Hall, William, 2005. *Benefits of enhanced-efficiency fertilizers for the environment*. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany, 28–30 June 2005.

Havlin, J. L, J. D. Beaton, S. L. Tisdale et W. L. Nelson, 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7th ed. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Hoeft, Robert G., Emerson D. Nafziger, Richard R. Johnson et Samuel R. Aldrich. 2000. *Modern Corn and Soybean Production, First Edition*. MCSP Publications, P.O. Box 248, Savoy, IL 61874-0248. *www.mcsp-pubs.com*.

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario.

Guide agronomique des grandes cultures, publication 811F.

Flue-Cured Tobacco Production Recommendations, publication 298 (en anglais seulement).

Recommandations pour les cultures fruitières, publication 360F.

Ginseng Production Recommendations, publication 610 (en anglais seulement).

Plantes de pépinière et d'ornement, culture et lutte intégrée, publication 383F.

Recommandations pour la gestion des gazons, publication 384F.

Recommandations pour les cultures légumières, publication 363F.

Office des normes générales du Canada. Hull, Canada K1A 1G6. *www.tpsgc.gc.ca/cgsb/home/index-f.html.*

Stevenson, C.K., 1994. *Peniccillium bilaii phosphorus research with corn*. Ridgetown College of Agricultural Technology report. 38 pp. Ridgetown, Ontario.

UNIDO et IFDC, 1998. *Fertilizer Manual* (3rd edition*).* 615 pages. ISBN 0-7923-5032-4. Kluwer Academic Publishers. *www.unido.org/en/doc/3551.*